

АНОТАЦІЯ

Тимчишин Б.С. Інтелектуалізована програмна система для проактивного управління екосистемою міста. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України.

У дисертаційній роботі розглянуто науково-прикладне завдання підвищення ефективності управління екосистемою урбанізованих територій шляхом розробки семантичних моделей, методів та інтелектуалізованої програмної системи для проактивного сценарного аналізу та оптимізації розміщення джерел техногенного навантаження.

У першому розділі виконано теоретичне узагальнення та обґрунтування підходів до розроблення інтелектуалізованої програмної системи проактивного управління екосистемою міста за умов невизначеності в даних. Встановлено, що традиційне реактивне управління («post-factum») є неефективним в умовах нелінійних та нестаціонарних процесів та щільної забудови, оскільки характеризується часовою затримкою між інцидентом та реакцією. Доведено необхідність переходу до проактивної моделі, яка базується на екологічному моделюванні для аналізу станів екосистеми міста з метою підвищення екологічної безпеки населення.

Проведено компаративний аналіз класів математичних моделей прогнозування розсіювання домішок в атмосфері від точкових джерел. Визначено, що для задач оперативного сценарного аналізу, який вимагає багаторазових розрахунків у прийнятному часі, оптимальними є Гаусові моделі, зокрема обчислювальне ядро AERMOD. Вони забезпечують найкращий баланс

між точністю та обчислювальною складністю, на відміну від CFD та Ейлерових моделей, які є надмірно ресурсоемними для оптимізаційних задач. Проаналізовано структурну організацію модуля AERMOD та його складових (AERMET, AERMAP, BIPPRIME). Показано, що його модульність та файловий інтерфейс дозволяють інтегрувати його як обчислювальне ядро в автоматизовані системи прийняття рішень.

Здійснено критичний огляд існуючих програмних засобів: AERMOD View, BREEZE AERMOD, SCREEN View. Виявлено критичний технологічний розрив – існуючі пакети є монолітними десктопними додатками, орієнтованими на статичний проектний аналіз та ручне введення даних. Вони не мають API для інтеграції з зовнішніми ресурсами та не підтримують автоматизований цикл «вхідні дані – моделювання – рішення». Обґрунтовано, що вирішення задач проактивного управління можливе шляхом розроблення інтелектуалізованої програмної системи. Вона має виступати як «оркестратор», що автоматизує роботу математичного ядра, забезпечує безшовний обмін даними та реалізує алгоритми сценарного аналізу, перетворюючи AERMOD на інструмент системи прийняття рішень. Здійснено постановку завдань дисертаційного дослідження.

У другому розділі обґрунтовано перехід від неструктурованих, файло-орієнтованих робочих процесів до формалізованої керованої знаннями моделі, що є необхідною передумовою для створення інтелектуалізованої системи проактивного управління. Проведений аналіз довів, що традиційні підходи до зберігання даних (файли, реляційні БД) є семантично бідними, негнучкими та нездатними ефективно моделювати складні, гетерогенні сутності міської екосистеми, що унеможлиблює автоматизацію сценарного аналізу.

Розроблено та обґрунтовано гібридну архітектуру збору та інтеграції даних. Дана архітектура використовує онтологію UESO як центральний семантичний хаб, що інкапсулює складність гетерогенних джерел (AERMET, BIPPRM, кадастр об'єктів теплогенерації) та відокремлює логіку знань від зберігання артефактів (файлове сховище) та гео-даних (PostGIS).

Спроектовано доменну онтологію UESO. Розроблена ієрархія класів формалізує не лише фізичні об'єкти (джерела та рецептори), але й ключові управлінські та обчислювальні сутності, забезпечуючи при цьому інтероперабельність через наслідування від онтологій верхнього рівня (SWEET, GeoSPARQL).

Формалізовано основи сценарного аналізу. На базі онтології UESO надано формалізоване визначення двох типів проактивного аналізу: оцінювального та оптимізаційного сценаріїв. Оцінювальний сценарій формалізовано як повний, самодостатній кортеж, що забезпечує відтворюваність експериментів «що-якщо». Оптимізаційний сценарій формалізовано як задачу комбінаторної оптимізації, для якої необхідно застосовувати метаевристичні алгоритми.

У третьому розділі розроблено математичну постановку задачі комбінаторної оптимізації розміщення джерел антропогенного забруднення, зокрема об'єктів теплогенерації враховуючи забудову міста. На відміну від класичних геометричних задач розміщення, запропонований підхід враховує суперпозицію полів концентрацій в точках-рецепторах та використовує модель AERMOD для обчислення цільової функції. Для гарантування дотримання екологічних стандартів цільова функція, що враховує індекс якості повітря, модифікована методом штрафних функцій, що дозволяє мінімізувати максимальний ризик перевищення ГДК у точках-рецепторах. Перехід до дискретного простору пошуку дозволив уникнути проблем локальних мінімумів, характерних для неперервних функцій.

Адаптовано метаевристичні алгоритми (генетичний алгоритм, дискретний метод рою часток, дискретний алгоритм бджолої колонії) для вирішення задач дискретної оптимізації фіксованої розмірності. Розроблено та реалізовано у фреймворку DEAP три уніфіковані оператори: `Create_Random_Solution()`, `Random_Swap()` та `Targeted_Swap()`, що дозволило уніфікувати програмну реалізацію різних евристик та гарантувати валідність рішень.

Запропоновано метод інтелектуалізованого вибору стратегії оптимізації, який базується на аналізі складності задачі. Введення порогів складності та масштабу дозволяє системі автоматично перемикатися між повним перебором (для тривіальних задач), D-PSO (для задач тактичного рівня) та D-ABC (для стратегічних задач високої розмірності). Це забезпечує баланс між часом отримання рішення та гарантією його оптимальності в умовах високої обчислювальної вартості звернень до модуля AERMOD. Проведено апробацію методу на прикладі розміщення трьох когенераційних установок у м. Тернопіль. Експеримент показав, що центральна частина мікрорайону є екологічно перевантаженою через високий фоновий рівень забруднення. На основі методу визначено оптимальну стратегію децентралізації критичної інфраструктури теплогенерації, запропонувавши розміщення, що дозволяє мінімізувати вплив на житлову забудову та навчальні заклади.

У четвертому розділі спроектовано гнучку сервіс-орієнтовану архітектуру програмної системи, ключовим елементом якої є розробка спеціалізованих сервісів-обгорт. Це дозволило успішно інтегрувати ядро регуляторної моделі AERMOD у сучасне веб-середовище, забезпечивши автоматизацію повного циклу розрахунків без необхідності ручного втручання в консольні процеси. Розгортання системи в кластері Kubernetes гарантує динамічне масштабування обчислювальних ресурсів при зростанні навантаження.

Також програмно реалізовано підсистему збереження даних на основі гібридної моделі. Поєднання семантичного сховища (для онтології UESO), реляційної бази даних з розширенням PostGIS (для геометрії) та об'єктного файлового сховища забезпечило реалізацію концепції «єдиного джерела істини». Такий підхід забезпечує синхронізацію даних та дозволяє автоматично валідувати сценарії моделювання ще до початку ресурсоемних розрахунків.

Розроблено інтерактивний веб-інтерфейс користувача із застосуванням UX-патернів, спрямованих на зниження когнітивного навантаження на

користувача. Реалізовані інструменти візуалізації (теплові карти забруднення, ізолінії, інтерактивні шари забудови) дозволяють оперативно інтерпретувати результати моделювання та приймати обґрунтовані управлінські рішення без необхідності глибокого аналізу текстових звітів. Результати навантажувального тестування засвідчили суттєве підвищення продуктивності: завдяки автоматизації підготовки даних та розпаралеленню обчислень час отримання розрахункового сценарію скорочено з годин (при ручному режимі) до хвилин (у 24 рази), що робить систему придатною для оперативного та гнучкого управління.

У висновках сформульовано основні результати дисертаційної роботи.

Ключові слова: інтелектуалізована програмна система, архітектура програмного забезпечення, програмне забезпечення, математичне моделювання, математична модель, нелінійні нестационарні процеси, екологічне моделювання, прогнозування, нелінійні задачі, ідентифікація, числові методи, точкове джерело, обчислювальний модуль, онтологія, оптимізаційна задача, методи оптимізації, цільова функція, метаевристичні алгоритми, критична інфраструктура, теплогенеруючі об'єкти, проактивне управління, екосистема міста, забруднення атмосфера, невизначеність даних, система підтримки рішень.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Тимчишин Б., Манжула В. Математичне та алгоритмічне забезпечення інтелектуалізованої програмної системи для проактивного управління екосистемою міста. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. вип. 84, вип. 4, с. 35–48. (1,2 д.а. / 0,9 д.а.; особистий внесок: запропоновано математичне та алгоритмічне забезпечення інтелектуалізованої системи для сценарного аналізу в межах проактивного управління екосистемою міста, формалізовано задачу оптимізації розміщення

джерел техногенного навантаження (зокрема, котелень та когенераційних установок) в умовах щільної міської забудови, яка NP-складною задачею дискретної комбінаторної оптимізації, запропоновано метод адаптивної оптимізації, який на основі порогів складності та масштабу автоматично обирає найбільш ефективний алгоритм).

DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-840-4>

2. В.І. Манжула, Б.С. Тимчишин. Семантичне моделювання гетерогенних джерел шкідливих викидів в атмосферу для проактивного управління екосистемою міста. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"*. 2025. №2 (41), с. 118–127. (1 д.а. / 0,8 д.а.; особистий внесок: розроблено доменну онтологію UESO, яка формалізує знання про гетерогенні міські джерела викидів та забезпечує семантичну інтероперабельність та логічну несуперечливість даних. Спроектовано та обґрунтовано сервісно-орієнтовану архітектуру інтелектуалізованої системи, де онтологія виступає «єдиним джерелом істини»).

DOI: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2025-2-41-118-127>

3. Тимчишин В., Мельник А., Дивак Т., Тимчишин Б., Файфура В., Момотюк Є., Костик Б. Інтегральний показник для оцінювання ефективності спеціалізованих моніторингових систем. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2024. 48(2). с. 234–241. (0,8 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: аналіз методів комплексної оцінки ефективності впровадження інтелектуалізованих систем моніторингу для підтвердження практичної цінності запропонованої системи).

DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-234-241>

4. Tymchyshyn V., Tymchyshyn B., Melnyk A., Manzhula V., Faifura V., Romanets I. The System Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. *Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies ACIT*. 2023, P. 58–62. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: обґрунтовано принципи побудови сервіс-орієнтованої архітектури для

екологічного моделювання, апробовано підхід до розбиття складної системи на незалежні модулі, який трансформувався в архітектуру «Оркестратора» для керування ядром AERMOD).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275416> (Scopus)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Tymchyshyn V., Melnyk A., Tymchyshyn B., Faifura V., Mazur I.-S., Honchar L. Data Management Service Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies ACIT. 2024, P. 678–682. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: розроблено механізми збору, валідації та маршрутизації гетерогенних даних для створення підсистеми збору даних, яка інтегрує Weather API та параметри джерел).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712526> (Scopus)

6. Tymchyshyn V., Porplytsya N., Melnyk A., Tymchyshyn B. Software for Modelling the Air Pollution by Vehicles. CEUR-WS: Proceedings of the International Conference Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2018). 2018. Vol 2300. pp. 207-210. (0,5 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: аналіз методів моделювання фонового забруднення від автотранспорту, що використано як вхідний параметр для оптимізаційних задач розміщення теплогенеруючих об'єктів).

<https://ceur-ws.org/Vol-2300/Paper50.pdf> (Scopus)

7. Тимчишин В.С., Порплиця Н.П., Тимчишин Б.С. Програмний комплекс для моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в часі. Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю ACIT'2017. Тернопіль: ТНЕУ, 2017. с.233-234. (0,2 д.а. / 0,05 д.а.; особистий внесок: проведено аналіз програмних засобів для моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами).

<https://dspace.wunu.edu.ua/items/55add516-6724-4334-8e74-9f53b6d3bbcc>

ANNOTATION

Tymchyshyn B.S. Intelligent software system for proactive urban ecosystem management. – Scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 121 – Software Engineering – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The research was carried out at the Department of Computer Sciences of the West Ukrainian National University, Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation addresses the scientific and applied task of improving the efficiency of managing the ecosystem of urbanized territories by developing semantic models, methods, and an intellectualized software system for proactive scenario analysis and optimization of the placement of sources of technogenic load.

The first chapter provides a theoretical generalization and substantiation of approaches to developing an intellectualized software system for proactive urban ecosystem management under conditions of data uncertainty. It is established that traditional reactive management ("post-factum") is ineffective under conditions of non-linear and non-stationary processes and dense building development, as it is characterized by a time delay between the incident and the response. The necessity of transitioning to a proactive model, which is based on ecological modeling for analyzing the states of the city's ecosystem to enhance the environmental safety of the population, is proven.

A comparative analysis of classes of mathematical models for forecasting the dispersion of impurities in the atmosphere from point sources was conducted. It was determined that for tasks of operational scenario analysis, which require multiple calculations within an acceptable time frame, Gaussian models, particularly the AERMOD computational core, are optimal. They provide the best balance between accuracy and computational complexity, unlike CFD and Eulerian models, which are excessively resource-intensive for optimization tasks. The structural organization of the AERMOD module and its components (AERMET, AERMAP, BPIPPRIME) is analyzed. It is shown that its modularity and file interface allow for its integration as

a computational core into automated decision support systems.

A critical review of existing software tools (AERMOD View, BREEZE AERMOD, SCREEN View) was carried out. A critical technological gap was identified: existing packages are monolithic desktop applications oriented towards static project analysis and manual data entry. They lack APIs for integration with external resources and do not support an automated "input data – modeling – solution" cycle. It is substantiated that solving proactive management tasks is possible by developing an intellectualized software system. This system should act as an "orchestrator" that automates the operation of the mathematical kernel, ensures seamless data exchange, and implements scenario analysis algorithms, transforming AERMOD into a decision support system tool. The objectives of the dissertation research were formulated.

The second chapter substantiates the transition from unstructured, file-oriented workflows to a formalized knowledge-driven model, which is a necessary prerequisite for creating an intellectualized system of proactive management. The analysis proved that traditional approaches to data storage (files, relational databases) are semantically poor, inflexible, and incapable of effectively modeling the complex, heterogeneous entities of the urban ecosystem, making the automation of scenario analysis impossible.

A hybrid architecture for data collection and integration was developed and substantiated. This architecture uses the UESO ontology as a central semantic hub that encapsulates the complexity of heterogeneous sources (AERMET, BPIPPRM, cadastral data of heat generation objects) and separates knowledge logic from artifact storage (file storage) and high-performance geodata (PostGIS).

The UESO domain ontology was designed. The developed class hierarchy formalizes not only physical objects (sources and receptors) but also key management and computational entities, while ensuring interoperability through inheritance from upper-level ontologies (SWEET, GeoSPARQL).

The foundations of scenario analysis were formalized. Based on the UESO ontology, a formalized definition of two types of proactive analysis was provided:

evaluation and optimization scenarios. The evaluation scenario is formalized as a complete, self-sufficient tuple ensuring the reproducibility of "what-if" experiments. The optimization scenario is formalized as a combinatorial optimization problem, which requires the application of metaheuristic algorithms.

The third chapter develops the mathematical formulation of the combinatorial optimization problem for placing sources of anthropogenic pollution, specifically heat generation objects, taking into account city buildings. Unlike classical geometric placement problems, the proposed approach considers the superposition of concentration fields at receptor points and uses the AERMOD model to calculate the objective function. To guarantee compliance with environmental standards, the objective function, which takes into account the air quality index, is modified by the penalty function method, allowing for the minimization of the maximum risk of exceeding the Maximum Permissible Concentration (MPC) at receptor points. The transition to a discrete search space allowed avoiding the problems of local minima characteristic of continuous functions.

Metaheuristic algorithms (Genetic Algorithm, Discrete Particle Swarm Optimization, Discrete Artificial Bee Colony algorithm) were adapted for solving discrete optimization problems of fixed dimensionality. Three unified operators were developed and implemented in the DEAP framework: `Create_Random_Solution()`, `Random_Swap()`, and `Targeted_Swap()`. This allowed for unifying the software implementation of various heuristics and guaranteeing the validity of solutions.

A method for the intellectualized selection of an optimization strategy based on problem complexity analysis is proposed. The introduction of complexity and scale thresholds allows the system to automatically switch between full enumeration (for trivial tasks), D-PSO (for tactical level tasks), and D-ABC (for strategic tasks of high dimensionality). This ensures a balance between the time to obtain a solution and the guarantee of its optimality under conditions of the high computational cost of calls to the AERMOD module. The method was tested on the example of placing three cogeneration units in Ternopil. The experiment showed that the central part of the microdistrict is environmentally overloaded due to a high background pollution level.

Based on the method, an optimal strategy for the decentralization of critical heat generation infrastructure was determined, proposing a placement that minimizes the impact on residential buildings and educational institutions.

The fourth chapter details the design of a flexible service-oriented architecture (SOA) for the software system, a key element of which is the development of specialized wrapper services. This allowed for the successful integration of the regulatory AERMOD kernel into a modern web environment, ensuring the automation of the full calculation cycle without the need for manual intervention in console processes. Deploying the system in a Kubernetes cluster guarantees the dynamic scaling of computational resources as the load increases.

A data storage subsystem based on a hybrid model was also software-implemented. The combination of a semantic repository (for UESO ontology), a relational database with PostGIS extension (for geometry), and object file storage ensured the realization of the "Single Source of Truth" concept. This approach ensures data synchronization and allows for the automatic validation of modeling scenarios even before the start of resource-intensive calculations.

An interactive web user interface was developed using UX patterns aimed at reducing the cognitive load on the user. Implemented visualization tools (pollution heatmaps, isolines, interactive building layers) allow for the operational interpretation of modeling results and the making of substantiated management decisions without the need for deep analysis of text reports. Load testing results demonstrated a significant increase in performance: thanks to the automation of data preparation and parallelization of calculations, the time to obtain a calculation scenario was reduced from hours (in manual mode) to minutes (by 24 times), making the system suitable for operational and flexible management.

The conclusions formulate the main results of the dissertation work.

Keywords: intelligent software system, software architecture, software, mathematical modeling, mathematical model, nonlinear non-stationary processes, environmental modeling, forecasting, nonlinear problems, identification, numerical

methods, point source, computational module, ontology, optimization problem, optimization methods, objective function, metaheuristic algorithms, critical infrastructure, heat-generating objects, proactive management, urban ecosystem, atmospheric pollution, data uncertainty, decision support system.

LIST OF PUBLISHED PAPERS BY THE TOPIC OF THESIS

Scientific papers in which the main scientific results of the dissertation were published:

1. Tymchyshyn B., Manzhula V. Mathematical and Algorithmic Support of an Intelligent Software System for Proactive Urban Ecosystem Management. Measurement and Computing Technology in Technological Processes. 2025. Issue 84, No. 4, pp. 35–48. (1,2 p.s. / 0,9 p.s.; personal contribution: a mathematical and algorithmic framework for an intelligent system for scenario analysis within proactive urban ecosystem management is proposed. The problem of optimizing the placement of technogenic load sources (in particular, boiler plants and cogeneration units) under conditions of dense urban development is formalized as an NP-hard discrete combinatorial optimization problem. An adaptive optimization method is proposed that automatically selects the most effective algorithm based on complexity and scale thresholds.

DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-840-4>

2. Manzhula V. I., Tymchyshyn B. S. Semantic Modeling of Heterogeneous Sources of Harmful Atmospheric Emissions for Proactive Urban Ecosystem Management. Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series: “Informatics, Cybernetics and Computer Engineering”. 2025. No. 2 (41), pp. 118–127. (1 p.s. / 0,8 p.s.; personal contribution: A UESO domain ontology has been developed, which formalizes knowledge about heterogeneous urban emission sources and ensures semantic interoperability and logical consistency of data. A service-oriented architecture of the intelligent system has been designed and substantiated, in which the ontology acts as a “single source of truth”).

DOI: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2025-2-41-118-127>

3. Tymchyshyn V., Melnyk A., Dyvak T., Tymchyshyn B., Faifura V., Momotiuk Ye., Kostyk B. An Integral Indicator for Evaluating the Efficiency of Specialized Monitoring Systems. Opto-Electronic Information and Energy Technologies. 2024. Vol. 48, No. 2, pp. 234–241. (0,8 p.s. / 0,2 p.s.; personal contribution: an analysis of methods for comprehensive evaluation of the effectiveness of implementing intelligent monitoring systems to substantiate the practical value of the proposed system).

DOI: <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-234-241>

4. Tymchyshyn V., Tymchyshyn B., Melnyk A., Manzhula V., Faifura V., Romanets I. The System Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies Acit. 2023, P. 58–62. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: the principles of constructing a service-oriented architecture for environmental modeling are substantiated. An approach to decomposing a complex system into independent modules has been validated, which was further transformed into an “Orchestrator” architecture for managing the AERMOD core).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275416> (Scopus)

Scientific works certifying the approval of the dissertation materials:

5. Tymchyshyn V., Melnyk A., Tymchyshyn B., Faifura V., Mazur I.-S., Honchar L. Data Management Service Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil. Proceedings International Conference on Advanced Computer Information Technologies Acit. 2024, P. 678–682. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: mechanisms for collecting, validating, and routing heterogeneous data have been developed to create a data acquisition subsystem that integrates Weather API data and source parameters).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712526> (Scopus)

6. Tymchyshyn V., Porplytsya N., Melnyk A., Tymchyshyn B. Software for Modelling the Air Pollution by Vehicles. CEUR-WS: Proceedings of the International Conference Advanced Computer Information Technologies (ACIT 2018). 2018. Vol 2300. pp. 207-210. (0,5 p.s. / 0,1 p.s.; personal contribution: an analysis of methods

for modeling background pollution from motor vehicles has been carried out and used as an input parameter for optimization problems related to the placement of heat-generating facilities).

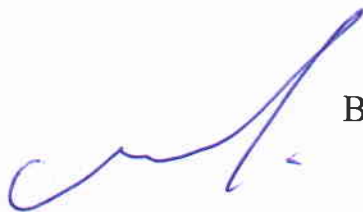
<https://ceur-ws.org/Vol-2300/Paper50.pdf> (Scopus)

7. Tymchyshyn V. S., Porplytsia N. P., Tymchyshyn B. S. A Software System for Temporal Modeling of Atmospheric Pollution Caused by Motor Vehicle Emissions. Modern Computer Information Technologies: Proceedings of the All-Ukrainian Conference with International Participation ACIT'2017. Ternopil: TNEU, 2017, pp. 233–234. (0,2 p.s. / 0,05 p.s.; personal contribution: an analysis of software tools for modeling atmospheric pollution by harmful emissions has been conducted).

<https://dspace.wunu.edu.ua/items/55add516-6724-4334-8e74-9f53b6d3bbcc>

Науковий керівник:

доктор технічних наук,
доцент, професор кафедри
комп'ютерних наук
Західноукраїнського
національного університету



Володимир МАНЖУЛА